

Обзорная статья / Review

DOI 10.15826/urej.2020.4.3.003

УДК 621.373.5

Автодин – многофункциональный элемент устройств формирования и обработки радиосигналов

В.Я. Носков¹✉, Р.Г. Галеев^{2, 3}, Е.В. Богатырев^{2, 3}

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

² Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

³ НПП «Радиосвязь», Россия, 660021, г. Красноярск, ул. Декабристов, 19

✉ v.y.noskov@urfu.ru

Аннотация

Изложены сведения об истории изобретения и развитии автодинной тематики, связанной с применением автодинов в устройствах формирования и обработки радиосигналов. Приведены краткие сведения об английском изобретателе автодина Г. Раунде, изобретателе электромузыкального инструмента терменвокс Л.С. Термене и других. Рассмотрены этапы становления и развития области применения автодинов в приемопередающих устройствах. Показана перспективность данного направления радиотехники, связанного с практическим использованием автодинов в гибридно-интегральных и монолитных приемопередающих модулях, выполненных по современной технологии КМОП. Эти модули, объединенные с активными антеннами, востребованы в системах «связи последней мили» для нужд Интернета и других.

Ключевые слова

автодин, автодинный генератор, приемопередающий модуль

Для цитирования

Носков В.Я., Галеев Р.Г., Богатырев Е.В. Автодин – многофункциональный элемент устройств формирования и обработки радиосигналов. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):293–317. DOI: 10.15826/urej.2020.4.3.003.

Autodyne – a Multifunctional Element of Devices for the Formation and Processing of Radio Signals

V.Ya. Noskov¹✉, R.G. Galeev^{2, 3}, E.V. Bogatyrev^{2, 3}

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 32 Mira Str., Yekaterinburg, 620002, Russia

² Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia

³ NPP “Radiosvyaz”, 19 Dekabristov Str., Krasnoyarsk, 660021, Russia

✉ v.y.noskov@urfu.ru, bogatblr@gmail.com

Abstract

The information about the history of invention and the development of autodyne topics related to the use of autodyne in devices for the formation and processing of radio signals is presented. This paper contains brief information about the English inventor of the autodyne H. Round, the inventor of the theremin L.S. Termene and others. The stages of formation and development of the field of autodyne application in transceiver devices are considered. The prospects of this direction of radio engineering associated with the practical use of autodyne in hybrid-integral and monolithic transceiver modules made by using modern CMOS technology are demonstrated. These modules, combined with active antennas, are in demand in last mile communication systems for the needs of the Internet and other services.

Keywords

autodyne, autodyne oscillator, transceiver module

For citation

Noskov V.Ya., Galeev R.G., Bogatyrev E.V. Autodyne – a Multifunctional Element of Devices for the Formation and Processing of Radio Signals. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(3):293–317. DOI: 10.15826/urej.2020.4.3.003.

1. Введение

Термины «автодинный прием» и «автодин» (от греч. autos – само и dynamis – способность) возникли в период становления радиотехники в связи с использованием ламповых регенеративных приемников и означали тогда следующее. «Автодинный прием – процесс приема радиосигналов с помощью биений, при котором электронная лампа служит одновременно и местным генератором высокой частоты и детектором...; такое устройство называется “автодином”; термин противопоставляется “гетеродинному приему”, при котором местным генератором высокой частоты является в соответствующей схеме отдельная электронная лампа» [1]. Данный термин и его со-

держание до сего времени так и остались в энциклопедических словарях практически без изменений¹. Тогда как сам «автодин», выражаясь образно, все эти годы жил своей жизнью, рос и развивался. Электронные лампы давно уже уступили место транзисторам. Появились новые типы активных элементов для СВЧ-генераторов, например диоды Ганна и ЛПД. Созданы гибридно-интегральные схемы и модули для автодинных систем ближней радиолокации и связи, датчиков и измерителей. Фантастически расширились диапазон частот и функциональные возможности автодинов.

Следует отметить, что история зарождения автодина и его развития непосредственно связана с историей радио и является ее составной частью. Проблемы генерирования, излучения и приема электромагнитных колебаний, которые в автодине принципиально существуют одновременно, решались постоянно, начиная с первых опытов Г. Герца, и этот процесс продолжается и в наши дни. Отделить в работах далекого прошлого, особенно в период становления радиотехники, в полученных результатах, где в ней «автодинное», а где «не автодинное», весьма сложно. Кроме того, каждый автор – это личность, порой с интересной судьбой, каждое новое техническое решение также тянет за собой цепочку предшествующих изобретений и новых персонажей. Анализировать полученные материалы прошлого чрезвычайно занимательно и полезно. Оставаясь в нынешнем положении необходимо войти в роль автора того времени, понять процесс нахождения нового с его позиций и дать оценку этого достижения уже с позиций наших дней, а порой – обнаружить нечто «новое в хорошо забытом старом». Поэтому написание истории научного направления – процесс довольно сложный и увлекательный, который в принципе закончить невозможно, он затягивает.

Цель настоящей статьи – представить ретроспективный обзор основных работ от появления и до наших дней одного из научных направлений автодинной тематики, связанного с применением автодинов в устройствах формирования и обработки радиосигналов. Представленная статья не претендует на полное и безупречное освещение всей многогранной истории автодинов. Решить такую задачу нереально в принципе, и авторы не ставили ее перед собой. Поэтому при подборе материала к данной статье авторы отдали предпочтение лишь основополагающим работам, а также тем, которые содержат оригинальные резуль-

¹ «Автодинный приемник – частный случай гетеродинного приемника, в котором гетеродин совмещен с регенеративным усилителем сигнальной частоты» [2, с. 428].

таты исследований и технические решения. При этом по возможности также отмечены заслуги творческого вклада основных персоналий. Намечены тенденции развития этого научного направления на ближайшую перспективу.

2. Автодин – многофункциональный элемент радиотехнических устройств

Исторически сложилось так, что в ходе развития радиотехники первым появилось то направление исследований автодинного эффекта и его применения, которое было связано с изучением процессов в генераторах, находящихся под воздействием излучения от стороннего источника. Как известно, в таких генераторах в зависимости от соотношения амплитуд и частот генератора и внешней силы возможны два главных режима работы: 1) *синхронный режим*, при котором благодаря явлению синхронизации (захвата частоты) частота колебаний генератора совпадает в установившемся режиме (или находится в целочисленном соотношении) с частотой внешнего воздействия; 2) *асинхронный режим*, при котором указанные частоты не связаны между собой напрямую и в автоколебательной системе наблюдаются *биения*, при которых амплитуда и фаза (частота) колебаний генератора медленно меняются по определенному закону².

Исследования этих режимов в автоколебательной системе начались вскоре после изобретения Мейснером (A. Meissner) лампового генератора (1913). Экспериментируя с различными вариантами схемы лампового генератора, инженер английской компании «Marconi's Wireless Telegraphy» Генри Раунд (Henry Joseph Round – см. рис. 1, а) открыл возможность высокочувствительного приема радиотелеграфных сигналов [3; 4]. Под действием внешних радиосигналов телеграфных посылок в генераторе возникали изменения амплитуды высокочастотных собственных колебаний, которые преобразовывались в «цуги» (биения) низкочастотных колебаний в цепи напряжения смещения электронной лампы (рис. 1, б). Эти биения затем прослушивались с помощью телефонов. Впоследствии данный принцип приема был назван *автодинным приемом*, а само устройство – *автогетеродинным* или *автодинным приемником* (autoheterodyne, self-heterodyne or autodyne receiver), или просто *автодином* (autodyne) [5; 6].

² Помимо этих двух типовых режимов в последние годы активно изучается режим так называемых хаотических колебаний, который проявляется при определенных условиях также в автодинных генераторах.

* * *

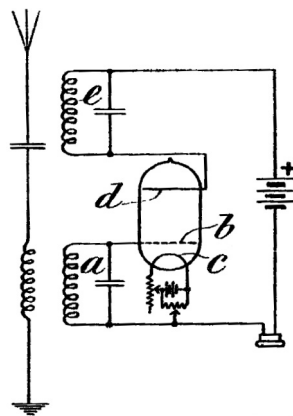
Генри Джозеф Раунд родился 2 июня 1881 г. в небольшом городке Кингсвинфорде (Kingswinford), который находится в графстве Стэффордшир, Англия. Сначала он учился в средней школе Челтенхэма (Cheltenham), а позже продолжил образование в Королевском Колледже Наук, где был отмечен почетным дипломом первой степени [6].

Генри Раунд начал свою профессиональную деятельность в компании Маркони (Marconi Company) в 1902 году. Компания только сформировалась, активно занималась «беспроводными» технологиями, вкладывая огромные инвестиции в развитие, поэтому она пока не имела достаточной прибыли. Несмотря на трудности со средствами, Г. Раунд был отправлен для стажировки в США к Д. Сарноффу (D. Sarnoff), будущему главе фирмы RCA.

За время стажировки он освоил технологию изготовления высокодобротных перестраиваемых катушек индуктивности для приемников и передатчиков, много экспериментировал с рамочной антенной для нахождения направления (пеленгации) на источник радиоволн и сделал несколько важных открытий, одно из которых более чем на 50 лет опередило свое время. Экспериментируя с кристаллическими детекторами, изготовленными из разных материалов, Раунд заметил, что при прикладывании к ним постоянного тока некоторые материалы излучали свет. Он сделал краткое сообщение об этом в журнале *Electrical*



а



б

Рис. 1. Генри Джозеф Раунд (1881–1962) – изобретатель автодина (а) и один из вариантов схемы автодина Генри Раунда (б) [3]

Fig. 1. Henry Joseph Round (1881–1962) – inventor of the autodyne (а) and one of the modifications of the Henry Round's autodyne scheme (b) [3]

World 9 февраля 1907 г. Это был первый известный отчет о светоизлучающих диодах, который опередил сообщение нашего соотечественника О.В. Лосева на 16 лет.

После возвращения из Америки Раунд занялся проблемой улучшения параметров электронных ламп. В 1913 г. и в последующий год Раунд запатентовал несколько идей по улучшению конструкции электронных ламп, включая катод косвенного подогрева, предложил использование сопротивления смещения на сетке («гридлик») и изобрел автодинный приемник (см. рис. 1, б).

В годы Первой мировой войны Раунд служил в звании капитана в военной разведке. Используя свой опыт, полученный в США, Раунд развернул сеть радиопеленгационных станций, с помощью которой удалось полностью контролировать радиопередачи и определять местоположение германского флота. Получаемые данные разведки с успехом использовались английским командованием в ходе сражений с германскими кораблями. Раунд внес большой вклад также в разработку первых телефонных радиостанций для самолетного использования. За все его заслуги во время войны он был награжден Военным Крестом и вошел в британскую историю как Капитан Раунд.

После завершения войны Раунд продолжил работать в компании Маркони. Он продолжил заниматься усовершенствованием электронных ламп, разработкой и развертыванием мощных радиостанций и организацией радиовещания. Построенные им станции в Великобритании были настолько мощными, что сигналы от некоторых из них принимались в Австралии. Кроме того, Раунд преуспел в создании различных конструкций микрофонов и в разработке системы граммофонной записи. Им была разработана также система для озвучивания публичных (внестудийных) выступлений, которая впервые использовалась для передачи речи английского короля Георга V на выставке в Уэмбли. В годы Второй мировой войны он был призван на работу в департамент адмиралтейства Великобритании, который работал на Британский



Рис. 2. Лев Сергеевич Термен (1896–1993) за исполнением пьесы Камиля Сен-Санса «Лебедь» на своем терменвоксе

Fig. 2. Lev S. Termen (1896–1993) performing the play «The Swan» by Camille Saint-Saens on his theremin

флот по программе создания сонара, где им были сделаны существенные разработки.

В 1951 г. он был отмечен радиоклубом Америки давно желаемой медалью Армстронга. Несмотря на награды и громадное значение его многих разработок, имя Капитана Раунда не очень широко известно, и он является во многом «неизвестным гением» радиотехники.

По своему характеру капитан Раунд был до некоторой степени индивидуалистом и экстравертом. Он был также невысокого роста и был, как говорят, похож на У. Черчилля даже привычкой курить сигары. Он также испытывал неприязнь к ненужным протоколам испытаний, предпочитая добираться до сути как можно быстрее.

Раунд женился дважды, в 1911 и 1960 гг., имел семерых детей: двух сыновей и пять дочерей. Умер в августе 1966 г. в частной больнице после короткой болезни.

* * *

Необходимо отметить, что практически в одно время с Раундом его коллегой по компании Франклином (C.S. Franklin), немцем Мейснером, а также американцами Армстронгом (E.H. Armstrong), Форестом (L.De Forest) и Ленгмюром (I. Langmuir) были независимо предложены различные варианты схем *регенеративного приемника*. Принципиальной основой этого приемника явилась та же самая схема, что у Раунда, но сформированная так, что генератор оказывался «недовозбужденным» и собственные колебания в нем отсутствовали. Этот вариант был назван впоследствии *регенератором* или *регенеративным приемником* [5; 6]. Понятно, что он отличается от автодинного приемника только величиной положительной обратной связи [7].

Широкое распространение регенеративные приемники получили как среди профессионалов, так и радиолюбителей³ [8]. Радиолюбителей особенно привлекала доступность и простота их изготовления, а также универсальность. При увеличении (говоря современным языком) глубины положительной обратной связи сверх порога возбуждения он автоматически из регенеративного приемника радиотелефонных сообщений становится приемником радиотелеграфных сигналов, то есть, по существу, автодином. При этом он обеспечивал очень высокие показатели чувствительности. Это позволило использовать автодинный приемник в качестве измерителя интенсивности радиосигналов различных

³ Режим доступа: http://www.radio-electronics.com/info/radio_history/gtnames/round/hjround.php (Дата обращения 17.10.2020).

радиостанций по величине тока в телефонах [9]. Известный полярный радист – радиолобитель Э.Т. Кренкель с дрейфующей станции Арктического бассейна 12 января 1930 г., используя такой приемник, установил мировой рекорд дальности радиосвязи, связавшись с Антарктической станцией Little-America⁴.

Запатентованный в 1921 г. первый электромузыкальный инструмент – терменвокс, использующий принцип выделения сигнала биений двух связанных через пространство генераторов, также по существу является автодином. Он положил начало целому направлению в искусстве и электронике – электромузыке. «Музыка сфер», «ангельский голос», «музыка эфирных волн», «инструмент без клавиш и без струн. Связь между инструментом и руками музыканта очевидна. Но связь эта нематериальна, эфемерна, на расстоянии» – такими восторженными возгласами была полна пресса Германии, а затем и других стран Европы и Америки, в которых гастролировал изобретатель инструмента Л.С. Термен в конце 20-х гг. (см. рис. 2) [10]. На основе предложенного им классического терменвокса была создана целая серия его модификаций, в том числе термен-виолончель, обладающая удивительными возможностями звучания. Необходимо отметить, что изобретатель музыкального прибора Л.С. Термен в свое время по заданию А.Ф. Иоффе разра-

ботал радиоизмерительный прибор для измерения диэлектрической постоянной газов при переменной температуре и давлении. Этот прибор, а также предложенные им оригинальные системы «емкостной» охраны музеев, банков, касс и тюрем, действовали также по автодинному принципу⁵.

Ярким событием в истории радиотехники и автодинов (в частности), намного опередившим время, явилось создание сотрудником Нижегородской радиолaborатории О.В. Лосевым (рис. 3) в 1922 г. нового типа автодинного приемника, работавшего от батарей, – «криста-



Рис. 3. Олег Владимирович Лосев (1903–1942) – пионер полупроводниковой техники в СССР

Fig. 3. Oleg V. Losev (1903–1942) – pioneer of semiconductor technology in the USSR

⁴ Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кренкель,_Эрнст_Теодорович (Дата обращения 17.10.2020).

⁵ Режим доступа: <https://statehistory.ru/1038/Lev-Termen/> (Дата обращения 17.10.2020).

дина» (рис. 4, а) [11–13]. В качестве активного элемента в нем использовался полупроводниковый кристаллический диод на основе цинкита (ZnO), имеющего при подаче питающего напряжения через балластное сопротивление падающий участок вольт-амперной характеристики (рис. 4, б). Это был первый автодинный приемник на полупроводниковом диоде, появившийся задолго до открытия современных полупроводниковых приборов. Зарубежные научные журналы называли кристадин Лосева «сенсационным изобретением», а самого девятнадцатилетнего Лосева – «профессором» [14]. В 1938 г. по представлению А.Ф. Иоффе за цикл исследований полупроводников ему была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук без защиты диссертации.

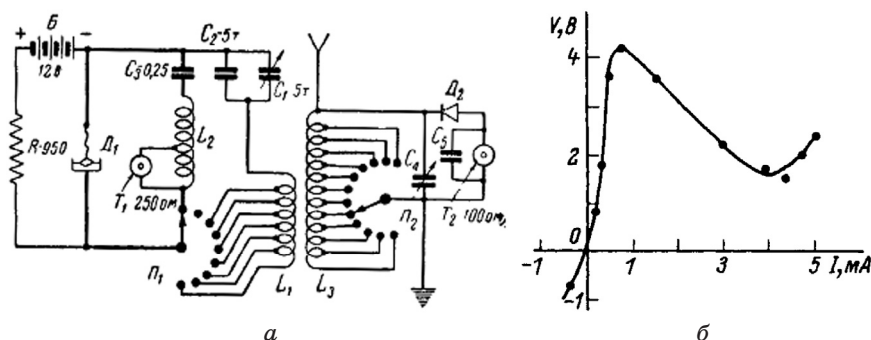


Рис. 4. Схема «кристодина» О.В. Лосева (а) и вольт-амперная характеристика кристаллического диода на основе цинкита (б)

Fig. 4. O.V. Losev's «kristodin» Circuit (a) and the current-voltage characteristic of a oxide of zinc-based crystal diode (b)

В 20-е и 30-е гг. прошлого столетия активно совершенствовались электронные лампы. В начале 30-х гг. уже широко применялись диоды, триоды, тетроды и пентоды. Вскоре были разработаны гептоды, гексоды и пентагриды. Совершенствовались конструкция и технология их изготовления. Появились электронные лампы в металлических корпусах, а также лампы желудевой конструкции, которые повысили надежность работы аппаратуры в метровом диапазоне. К концу 30-х гг. завершилась разработка миниатюрной бесцокольной лампы для дециметрового диапазона [15]. В связи со значительной загруженностью диапазона частот начались серьезные исследования новых видов модуляции и методов, повышающих помехоустойчивость приема радиосигналов.

Например, в журнале «Радиолобитель» № 6 за 1924 г. (с. 86) приведено краткое сообщение о том, что 5-го октября в Нижегородской радиолaborатории им. Ленина состоялся научно-техни-

ческий семинар. На нем профессор М.А. Бонч-Бруевич изложил суть предложенного им нового способа радиотелефонирования, основанного на «изменении периода» колебаний. Новый способ модуляции, по словам докладчика, позволяет сделать радиосвязь скрытной для радиоприемников обычных АМ сигналов. Только станции, располагающие специальной схемой демодуляции могут принимать сообщения. Кроме того, высказано предположение, что с новым способом модуляции дальность связи при той же мощности передатчика может быть значительно увеличена, а помехи от посторонних радиостанций сильно уменьшены. Передача и прием сигналов демонстрировались на лабораторной модели. Однако, как нам теперь известно [16], в использовании нового для того времени вида модуляции значительно приуспел американский профессор и талантливый изобретатель Э.Г. Армстронг, получивший в декабре 1933 г. сразу 4 патента на частотную модуляцию (ЧМ). Несколько ранее за изобретение однополосной модуляции был выдан патент Д.Р. Карсона (J.R. Carson) [15].

В поиске методов повышения помехоустойчивости приема радиосигналов в те годы также были значительные успехи. Один из методов улучшения качества приема радиосигналов с амплитудной модуляцией (АМ) – метод *синхронного детектирования*. Первые наблюдения, послужившие стимулом для его дальнейшего исследования, относятся к 1924 г. [17]. Коулбрук (F.M. Colebrook) было замечено, что при точном совпадении частоты гетеродина или автоколебаний в регенераторе (точнее, автодине) с частотой несущей АМ сигнала имеет место ослабление помех от радиостанций, работающих на близких частотах. В таком случае при приеме АМ сигналов он становится *автодинным синхронным приемником* или *синхродином*, в котором регистрация изменений режима генератора обеспечивает возможность получения передаваемых сообщений [18]. Этот способ приема аналогичен *гетеродинному* методу в частном случае равенства частоты гетеродина частоте несущей АМ сигнала. Но этот метод ранее получил свое название – *гомодинного* [18]. Его применение в те годы затруднялось отсутствием способа точной синхронизации гетеродина и несущей принимаемого сигнала. Позже вместо термина «гомодинный» преимущественно стал использоваться термин *приемник прямого преобразования*.

Явление подавления помех в автодинном синхронном приемнике или синхродине объясняется просто. Добавление синфазного напряжения к принимаемому сигналу, в сущности, эквивалентно повышению уровня этого сигнала. В результате чего растет превышение его над помехой, что и приводит к ее по-

давлению. Интерес к этому способу приема особенно усилился, когда в конце 20-х гг. были проведены обстоятельные исследования взаимодействия сильного и слабого АМ сигналов при амплитудном детектировании их суммы [19]. Эффект подавления помехи в детекторе более сильным сигналом интенсивно исследовался и в последующие годы. В 1930–1931 гг. этот эффект был использован английским инженером Е. Робинсоном в приемнике, получившем название «стенод-радиостат» [20]. Он обеспечивал подавление помех даже в случае нахождения ее внутри спектра принимаемого сигнала [21].

Существенный вклад в теорию синхронного приема внес наш соотечественник Е.Г. Момот, который в своей книге [22] рассмотрел широкий круг проблем синхронного приема, в том числе исследовал процесс захватывания частоты генератора входным сигналом, а также влияние фазовой модуляции сигнала на работу генератора. В случае воздействия на генератор радиосигналов с частотной модуляцией (ЧМ) он в режиме захвата также обеспечивает возможность их селекции и демодуляции [23; 24]. При этом автодинный генератор реализует известную идею следящего приема радиосигналов с ЧМ для повышения помехоустойчивости [25–28].

По мере развития радиотехники *автодинные приемники*, несмотря на их достоинство (крайнюю простоту), во второй половине 20-х гг. были потеснены *сверхрегенеративными*, а затем *супергетеродинными* приемниками, обладающими существенно лучшими характеристиками. Однако с появлением супергетеродинных приемников для сокращения количества ламп стали использоваться автодинные преобразователи частоты, совмещающие смеситель и гетеродин в одном каскаде. Для расширения частотного диапазона имеющихся у населения приемников предлагались недорогие приставки к ним, выполненные всего на одной лампе, которые работали в режиме автодинного преобразования частоты.

После появления специальных ламп для преобразования частоты интерес к автодинам несколько угас. Однако процесс развития и совершенствования автодинов не остановился, и они продолжали применяться в тех радиоприемных устройствах, в которых простота конструкции и низкая стоимость являлись определяющими. Эти положительные качества автодинных приемников привлекали радиолюбителей в последующие годы. Популярный в пятидесятые годы регенеративный приемник А.В. Прозоровского, например, обеспечивал чувствительность в автодинном режиме порядка единиц микровольт. Известный популяризатор радиотехники В.Т. Поляков не только дал вто-

рую жизнь синхродину, но и создал оригинальную и несложную в изготовлении схему автодинного синхронного приемника на современной элементной базе. Индивидуальная приемная установка для спутникового приема телевизионных программ, в которой использовался автодинный преобразователь частоты на диоде Ганна, подробно описана С.К. Сотниковым на страницах журнала «Радио» в конце 1990 – начале 1991 гг.

Интерес к автодинному принципу формирования и обработки радиосигналов по-прежнему сохранился среди специалистов-разработчиков аппаратуры СВЧ, в которой генераторы используются не только в качестве автодинных конверторов, смесителей и преобразователей частоты⁶ [29; 30], но и автодинных синхронных и асинхронных детекторов [31; 32]. Среди отечественных ученых, внесших значительный вклад в развитие данного направления, необходимо отметить доктора технических наук, профессора Алексеева Ю.И. (рис. 5), основателя научной школы в Таганрогском радиотехническом университете. Основное направление научной деятельности этой школы – изучение автодинных асинхронных генераторно-преобразовательных систем на основе твердотельных приборов СВЧ регенеративного типа (ганновских, лавинно-пролетных и лазерных диодах). Это направление с точки зрения универсальности и возможности применения для улучшения параметров приемопередающих СВЧ-устройств является одним из наиболее перспективных. В основе такого улучшения лежат транспонирующие свойства многофункциональных автодинных асинхронных систем, решающие проблему создания широкодиапазонных частотно-модулированных источников СВЧ-колебаний с высокими техническими параметрами и характеристиками, особенно с выходом в оптический диапазон длин волн [33–37].

Из обзора литературы, посвященной автодинной тематике второй половины прошлого века, видно, что в зарубежных публикациях, начиная с 50-х гг., в отношении автодинов все чаще



Рис. 5. Юрий Иванович Алексеев (1937–2014)

Fig. 5. Yuri I. Alekseev (1937–2014)

⁶ Экспериментальное исследование автодинного преобразователя частоты, работающего в миллиметровом диапазоне длин волн. Режим доступа: <http://ramed.wikidot.com/diod-gann-experiment-autodin> (Дата обращения 17.10.2020).

использовались такие термины как, автоколебательный преобразователь частоты (self-oscillator frequency converter), самосмешивающий генератор (self-mixing oscillator), самовозбужденный смеситель (self-excited mixer), автогенераторный смеситель (self-oscillator mixer – SOM) и др. [38–44]. В этот период появились новые типы твердотельных генераторных приборов СВЧ-диапазона, к исследованию и применению которых было приковано внимание многих ученых, не знакомых с автодинной тематикой.

Среди зарубежных ученых современности, внесших значительный вклад в развитие теории и техники СВЧ, необходимо отметить профессора, доктора наук, заведующего кафедрой СВЧ и КВЧ электроники Калифорнийского университета (Лос-Анджелес, США) Тацуо Ито (Tatsuo Itoh)⁷. Он является общепризнанным лидером нашего времени в применении самых передовых технологий и технических решений в данной области электроники. Тацуо Ито совместно с большим числом своих аспирантов со всего мира (см. рис. 6) реализует идеи в области разработки перспективных топологий гибридно-интегральных схем СВЧ- и КВЧ-диапазонов для систем беспроводной связи и радиолокации, телеметрии и идентификации объектов (radio frequency identification – RFID), а также для средств СВЧ-измерений. Среди объектов его исследований – различные интегральные пассивные и активные элементы, многослойные волновые и фотонные структуры [45], в том числе из метаматериалов, генераторно-излучающие модули на основе открытых береговых отражателей [46; 47] и активные интегральные антенны [48; 49], а также автодинные преобразователи частоты и модули [50–52]. Тацуо Ито – пионер в освоении терагерцового диапазона частот [53].



Рис. 6. Профессор Тацуо Ито среди своих аспирантов со всего мира

Fig. 6. Professor Tatsuo Itoh among his post-graduate students from all over the world

⁷ Режим доступа: <http://www.mwlab.ee.ucla.edu/itoh.html> (Дата обращения 17.10.2020).

Несмотря на значительные успехи в микроэлектронике, интерес к использованию автодинных устройств сохранился и в наши дни. Современные тенденции в развитии коммерческих систем связи требуют создания малогабаритных и недорогих радиочастотных (РЧ), СВЧ- и КВЧ-схем. Одно из перспективных решений в этом направлении – использование multifunctional элементов, к которым относятся автодины, объединяющие функции усилителя, генератора и преобразователя частоты. Рассмотрим ряд наиболее интересных публикаций последнего времени, в которых Тацуо Ито и другие авторы представили описание ряда оригинальных устройств, выполненных на основе автодинов.

Например, в статье [52] приведено описание недорогого приемного модуля на частоту 60 ГГц для узкополосной связи на малых расстояниях, выполненного на основе балансного автодинного смесителя, совмещенного с встроенной в модуль дипольной антенной. Смеситель выполнен по двухтактной схеме на рНЕМТ-транзисторах с высокой подвижностью электронов. Частота генерации 30 ГГц стабилизирована диэлектрическим резонатором. Прием радиосигналов производится на второй гармонике частоты генерации. Смеситель имеет потери преобразования менее 15 дБ, утечку излучения 26 дБмВт на частоте 60 ГГц и фазовый шум на промежуточной частоте (ПЧ) 1,0 ГГц около 95 дБн/Гц при отстройке 100 кГц.

В статье [54] представлены результаты исследования простого автодинного смесителя на диапазон частот от 3 до 4 ГГц, выполненного на двухзатворном транзисторе (см. рис. 7, а). На первый затвор транзистора подается сигнал от встроенной в схему модуля патч-антенны. Второй затвор участвует в образовании обратной связи генератора-гетеродина, частота которого стабилизирована диэлектрическим резонатором DR. Результаты экспериментов подтвердили работоспособность схемы.

В статье [55] представлена новая топология автодинного субгармонического смесителя для систем связи миллиметрового диапазона (см. рис. 7, б). Смеситель выполнен на основе полосового фильтра SIW, полевого транзистора с гетеропереходом и фильтра нижних частот. В этом смесителе для создания рабочих мод одновременной генерации и передачи сигнала в резонаторе на входе полевого транзистора используется топология интегрированного волновода (substrate integrated waveguide – SIW). Данный волновод сформирован в диэлектрической подложке путем плотного размещения сквозных металлизированных отверстий, которые соединяют верхнюю и нижнюю металлические пластины подложки. Основная мода резонато-

ра SIW используется для селекции радиосигналов, а вторая мода – для создания колебаний гетеродина. Предложенная конструкция легко интегрируется непосредственно с антенной. Результаты измерений экспериментального образца смесителя показали, что потери преобразования составляют около 12 дБ на частоте 34 ГГц. Измеренный фазовый шум сигнала ПЧ составляет около 81 дБн/Гц при отстройке 100 кГц.

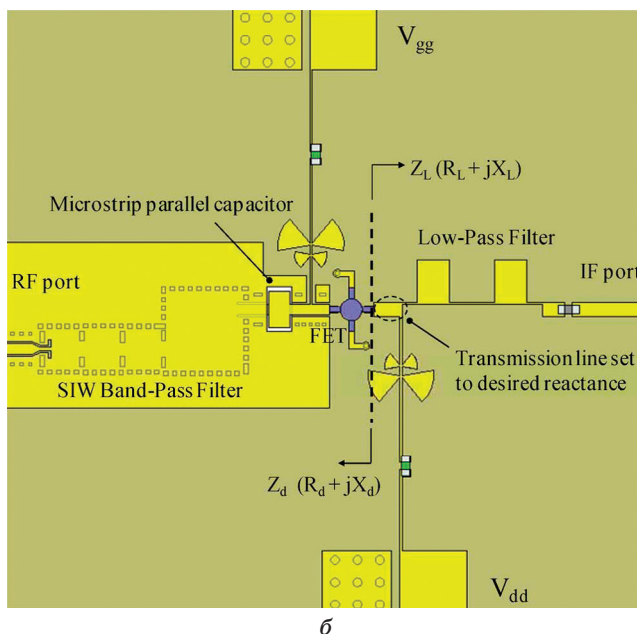
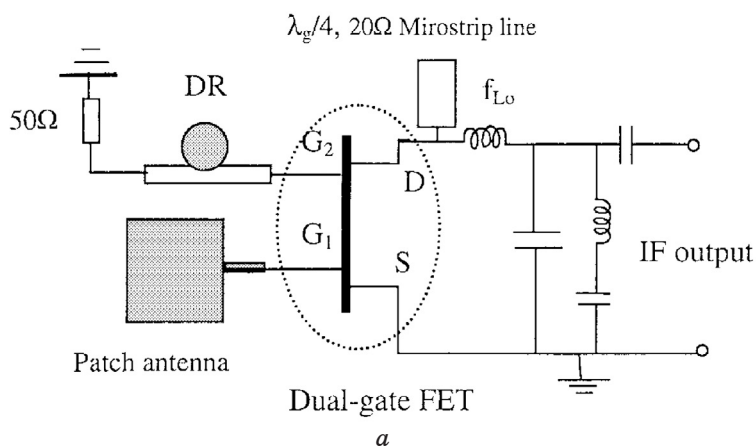


Рис. 7. Схемы автодинных смесителей на двухзатворном полевом транзисторе (а) [53] и полевом транзисторе с гетеропереходом (б) [54]
Fig. 7. Schemes of autodyne mixers on a two-gate field-effect transistor (a) [53] and a field-effect transistor with a heterojunction (b) [54]

Предложен простой автодинный смеситель с высокой добротностью резонансной системы в цепи параллельной обратной связи полевого транзистора [56]. Эта цепь состоит из последовательного соединения щелевого квадратного патч-резонатора и планарной патч-антенны (см. рис. 8). Такое соединение образует двухполюсный полосовой фильтр с высоким пиковым значением групповой задержки. Генерация колебаний автодина около пиковой частоты групповой задержки обеспечивает низкое значение фазового шума, что улучшает остальные параметры смесителя. Измеренный фазовый шум составил $-102,38$ дБн/Гц при смещении на 100 кГц. Выходная мощность автодинного смесителя 4,2 дБм, КПД 46,7% и коэффициент преобразования 4,45 дБ.

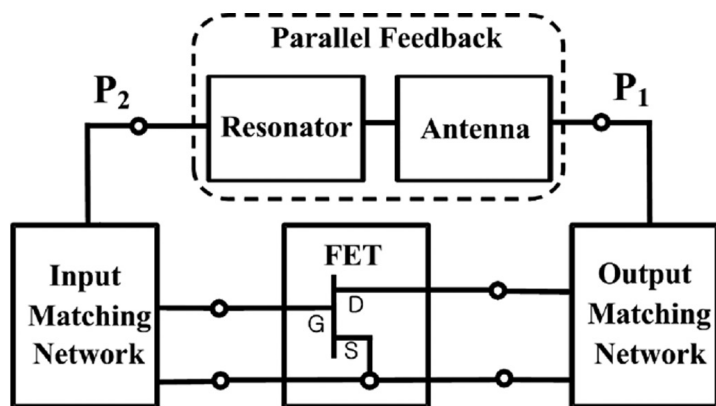
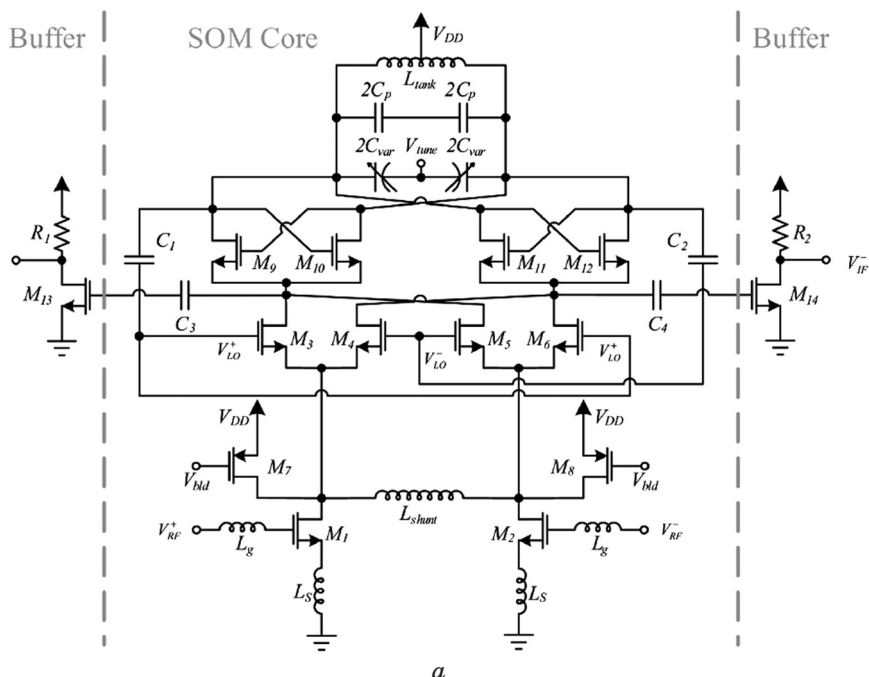


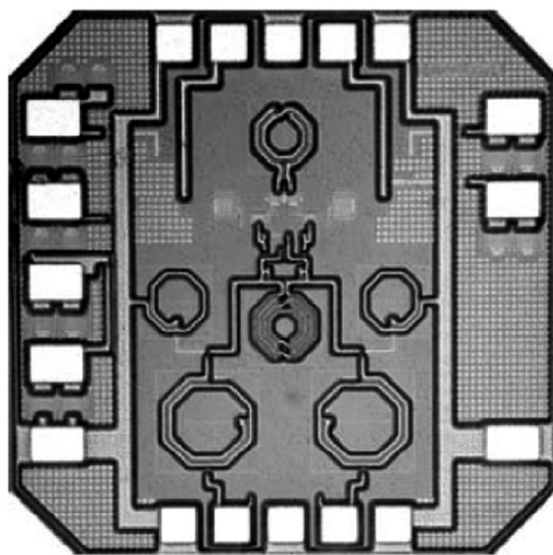
Рис. 8. Схема автодинного смесителя на полевом транзисторе с параллельной обратной связью через патч-антенну и патч-резонатор [55]

Fig. 8. Circuit of an autodyne mixer on a field-effect transistor with parallel feedback via a patch antenna and a patch resonator [55]

В статье [57] описан малошумящий автодинный смеситель, работающий в диапазоне от 7,8 до 8,8 ГГц. Смеситель включает в себя три основных ядра, выполненных по схеме двойного балансного каскада на КМОП-транзисторах: генератор, смеситель и малошумящий усилитель (рис. 9, а). Он выполнен в виде многослойного чипа (рис. 9, б). Питание всех каскадов от однополярного источника напряжения. Измерения его параметров показали, что смеситель обеспечивает коэффициент шума 4,39 дБ и коэффициент преобразования 11,6 дБ. Частота ПЧ 300 МГц. Потребление от источника постоянно-го тока 12 мВт, площадь чипа 0,47 мм² без учета контактных площадок.



a



б

Рис. 9. Схема малошумящего балансного автодинного смесителя с возможностью электронного управления частотой (а) и фотография (б) его чипа [56]

Fig. 9. Diagram of a low-noise balanced autodyne mixer with the possibility of electronic frequency control (a) and a photo (b) of its chip [56]

3. Заключение

Из представленного нами обзора следует, что перспектива сокращения количества деталей, энергопотребления и стоимости системы за счет объединения функций смещения и генерации колебаний гетеродина в один схемный модуль объясняет длительную привлекательность автодинных устройств. Широкая популярность их в период первой половины XX в. объясняется тем, что экономика электронной промышленности в то время делала их конкурентоспособными на рынке радиотехнической аппаратуры. Однако появление твердотельных устройств изменило динамику применения автодинов, и они на долгое время превратились преимущественно в объект любопытства радиолюбителей, вплоть до начала XXI в.

В настоящее время у автодинных смесителей снова появилось многообещающее будущее, потому что они естественным образом подходят для приемопередающих модулей, объединенных с активными антеннами. Наиболее широким применением таких модулей в наши дни является «связь последней мили» для нужд Интернета. Кроме того, современные технологии, связанные с созданием перспективных радиолокационных и телекоммуникационных устройств, также выиграют от последних достижений в области КМОП-автодинов [57, 58]. Потому что их технические характеристики при оценке на системном уровне теперь сопоставимы с использованием отдельных блоков смесителя и генератора. Поэтому в обозримом будущем автодины сохранят востребованность в устройствах формирования и обработки радиосигналов.

Список литературы

1. Мартенс Л.К. (ред.) *Техническая энциклопедия*. М.: Советская энциклопедия; 1929. Т. 1.
2. Мазор Ю.Л., Мачусский Е.А., Правда В.И. (ред.) *Радиотехника: Энциклопедия*. М.: Додэка-XXI; 2010.
3. Round H.J. *Improvements in Receivers for use in Wireless Telegraphy*. Patent GB191328413, 09.12.1913.
4. Marconi W.T., Round H.J. *Improvements in the Production of Continuous Electrical Oscillations, and in the utilization thereof for Wireless Telegraphy and Telephony*. Patent GB191413248, 29.05.1914.
5. Morse A.H. *Radio: Beam and Broadcast. Its Story and Patents*. London: Ernest Benn Limited; 1925.
6. Collins A.F. *The Radio Amateur's Hand Book*. New York: T.Y. Crowell, Revised edition; 1922.
7. Turker D.G. The History of Positive Feedback: The Oscillating Audion, the Regenerative Receiver, and other applications up to around 1923. *The Radio and Electronic Engineer*. 1972;42(2):69–80.

8. Шамшур В.И. *Первые годы советской радиотехники и радиолубительства*. М.: Госэнергоиздат; 1954.
9. Austin L.W. Reception Measurements at Naval Radio Research Laboratory, Washington. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*. 1922;10(3):158–160.
10. Галеев Б.М. *Легендарный Термен. Репрессированная наука*. Л.: Наука; 1991.
11. Лебединский В.К. Радио, его достижения и перспективы. В: Иоффе А.Ф., Кржижановский Г.М., Лапинов-Скобло М.Я., Ферсман А.Е. (ред.) *Наука и техника СССР: 1917–1927*. М.: Работник просвещения; 1928. С. 263–316.
12. Лосев О.В. Детектор-генератор; детектор-усилитель. *Телеграфия и телефония без проводов*. 1922;(14):374–366.
13. Лосев О.В. *У истоков полупроводниковой техники. Избранные труды*. Л.: Наука; 1971.
14. Новиков М.А. Олег Владимирович Лосев – пионер полупроводниковой электроники (К столетию со дня рождения). *Физика твердого тела*. 2004;46(1):5–9.
15. Сифоров В.И. (ред.) *Электроника: прошлое, настоящее, будущее*. М.: Мир; 1980.
16. Самохин В.П., Киндяков Б.М. Памяти Эдвина Армстронга (18.12.1890–31.01.1954). *Наука и образование*. 2014;(1). Режим доступа: <http://engineering-science.ru/doc/695338.html>
17. Colebrook F.M. Homodyne. *Wireless World and Radio Rev.* 1924(13):774.
18. Tucker D.G. The History of the Homodyne and Synchrodyne. *Journal of the British Institution of Radio Engineers*. 1954;14(4):143–154.
19. Beatty R.T. The apparent demodulation of weak station by a strong one. *The Wireless Engineer and Experimental Wireless*. 1928(6):412–420.
20. Кияшко А. О чем писал журнал «Радиолубитель» № 10, 1930 г. *Радио*. 1989(10):95.
21. Aiken C.B. Theory of the detection of two modulation waves by a linear rectifier. *Proc. IRE*. 1933;21(4):601–629.
22. Момот Е.Г. *Проблемы и техника синхронного радиоприема*. М.: Госэнергоиздат; 1941.
23. Hobson G.S., Thomas M. Direct frequency demodulation with frequency-locked Gunn oscillators. *Electronics Letters*. 1971;7(3):67–68.
24. Фомин Н.Н. (ред.) *Радиотехнические устройства СВЧ на синхронизированных генераторах*. М.: Радио и связь; 1991.
25. Snaffee J.G. The application of negative feedback to frequency modulation systems. *Proceedings of the IRE*. 1939;27(5):317–331.
26. Виницкий А.С. *Передачик или приемник частотно-модулированных колебаний. Авт. свид. № 63529*. (СССР) Заявл. 09.09.1940, опубл. 30.04.1944.
27. Евтянов С.И., Шеманаев Г.Д. Синхронизация автогенератора со следящей подстройкой контура. *Электросвязь*. 1962;(5):3–11.
28. Гусева В.А., Родионов Я.Г. Синхронизированный автогенератор со следящей настройкой. *Электросвязь*. 1969;(11):31–38.

29. Алексеев Ю.И. Устойчивость автодинных асинхронных СВЧ-систем. *Радиотехника*. 1994;(3):36.

30. Алексеев Ю.И. Автодинный частотный преобразователь миллиметрового диапазона. *Радиотехника*. 2003;(2):76–78.

31. Горбин В.В., Малышев В.А., Петросян А.В. Автодинный асинхронный детектор СВЧ на туннельном диоде, работающий на гармониках частоты генерации. *Радиотехника*. 1976;31(12):58–62.

32. Левтеров А.Н., Радченко А.Ф., Кротов В.И. Исследование асинхронного детектора с самонакачкой на диоде Ганна. *Радиотехника*. 1984;(1):37–38.

33. Демьяненко А.В., Алексеев Ю.И. Использование лавинно-пролетного диода для детектирования СВЧ амплитудно-модулированных оптических колебаний. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2010(4):70–74.

34. Демьяненко А.В., Алексеев Ю.И., Ковтун Д.Г. Импедансные свойства лавинно-пролетного диода в режиме автодинного преобразования оптических СВЧ-модулированных колебаний. *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 2013;(3):75–79.

35. Ле Тхай Шон, Алексеев Ю.И., Орда-Жигулина М.В. Чувствительность системы автодинного детектирования СВЧ-амплитудно-модулированных оптических сигналов. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2013;(1):68–72.

36. Алексеев Ю.И. О некоторых аспектах применения автодинных асинхронных радиотехнических систем. *Радиотехника и электроника*. 2013;58(7):699–703.

37. Алексеев Ю.И., Демьяненко А.В. Сопоставление результатов детектирования СВЧ-модулированных оптических колебаний лавинно-пролетными диодами в режимах усиления, генерации и автодинного преобразования. *Антенны*. 2014;(9):75–78.

38. Sunstein D.E. A New Self-Oscillating Frequency Converter. *IRE Transactions on Broadcast and Television Receivers*. 1955;BTR-1(1):29–35.

39. Nagano S., Ueno H., Kondo H., Murakami H. Self-excited microwave mixer with a Gunn diode and its applications to Doppler radar. *Transaction IECE Japan*. 1969;52-B(3):179–180.

40. Lazarus M.J., Novak S., Bullimore E.D. A Sensitive Millimeter-Wave Self-Oscillating Gunn Diode Mixer. *Proceedings of the IEEE*. 1971;59(5):812–814.

41. Kotani M., Mitsui S. Self-Mixing Effect of Gunn Oscillator. *Electronics and Communication in Japan*. 1972;55-B(12):60–67.

42. Inngs M.R. Self-Oscillating Mixer Cuts Antenna Test Costs. *MicroWaves*. 1978;17(4):100–102.

43. Dixon S., Jacobs H. Millimeter wave self-mixing oscillators. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1981;2(2):347–360.

44. Pantoja F.R., Calazans E.T. Teoretical and Experimental Studies of Gain Compression of Millimeter-Wave Self-Oscillating Mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1985;33(3):181–186.

45. Itoh T. Quasi-optical microwave circuits for wireless applications. *Microwave Journal*. 1995;38(1):64–85.

46. Itoh T., Hsu F.J. Distributed Bragg Reflector Gunn Oscillators for Dielectric Millimeter-Wave Integrated Circuits. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 1979;27(5):514–518.
47. Song B.S., Itoh T. Distributed Bragg Reflection Dielectric Waveguide Oscillators. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 1979;27(12):1019–1022.
48. Pobanz C.W., Itoh T. Active integrated antennas. *IEEE Potentials*. 1997;16(2):6–10.
49. Chang K., York R.A., Hall P.S., Itoh T. Active integrated antennas. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002;50(3):937–944.
50. Hwang V.D., Itoh T. Quasi-Optical HEMT and MESFET Self-Oscillating Mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1988;36(12):1701–1705.
51. Chew S.T., Itoh T. Application of Volterra Series to the Problem of Self-Oscillating Mixer. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1996;44(2):269–274.
52. Sironen M., Qian Y., Itoh T. A Subharmonic Self-Oscillating Mixer with Integrated Antenna for 60-GHz Wireless Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001;49(3):442–450.
53. Siegel P.H. Terahertz Pioneer: Tatsuo Itoh “Transmission Lines and Antennas: Left and Right”. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2014;4(3):298–306.
54. Zhang J., Wang Y., Chen Z, Integration of a Self-Oscillating Mixer and an Active Antenna. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. 1999;9(3):117–119.
55. Zhen-Yu Zhang, Ke Wu, Ning Yang. A Millimeter-Wave Sub-Harmonic Self-Oscillating Mixer Using Dual-Mode Substrate Integrated Waveguide Cavity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010;58(5):1151–1158.
56. Sun-Hwa Jeong, Hee-Yong Hwang. X-Band Self Oscillating Mixer With Resonator-Antenna Filter. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2014;24(9):611–613.
57. Ho S.S.K., Saavedra C.E. A low-noise self-oscillating mixer using a balanced VCO load. *IEEE Trans. Circuits Systems. I: Regular Papers*. 2011;58(8):1705–1712.
58. Saavedra C.E., Jackson B.R., Ho S.S.K. Self-Oscillating Mixers: A Natural Fit for Active Antennas. *IEEE Microwave Magazine*. 2013;14(6):40–49.

References

1. Martens L.K. (ed.) *Technical encyclopedia*. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya; 1929. Vol. 1. (In Russ.)
2. Mazor Yu.L., Machusskii E.A., Pravda V.I. (eds) *Radio engineering: Encyclopedia*. Moscow: Dodeka-XXI; 2010. (In Russ.)
3. Round H.J. *Improvements in Receivers for use in Wireless Telegraphy*. Patent GB191328413, 09.12.1913.

4. Marconi W.T., Round H.J. *Improvements in the Production of Continous Electrical Oscillations, and in the utilization thereof for Wireless Telegraphy and Telephony. Patent GB191413248*, 29.05.1914.
5. Morse A.H. *Radio: Beam and Broadcast. Its Story and Patents*. London: Ernest Benn Limited; 1925.
6. Collins A.F. *The Radio Amateur's Hand Book*. New York: T.Y. Crowell, Revised edition; 1922.
7. Turker D.G. The History of Positive Feedback: The Oscillating Audion, the Regenerative Receiver, and other applications up to around 1923. *The Radio and Electronic Engineer*. 1972;42(2):69–80.
8. Shamshur V.I. *The first years of radio engineering and radio amateurism*. Moscow: Gosenergoizdat; 1954. (In Russ.)
9. Austin L.W. Reception Measurements at Naval Radio Research Laboratory, Washington. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*. 1922;10(3):158–160.
10. Galeev B.M. *Legendary Theremin. Repressed science*. Leningrad: Nauka; 1991. (In Russ.)
11. Lebedinsky V.K. Radio, its achievements and prospects. In: Ioffe A.F., Krzhizhanovskiy G.M., Lapirov-Skoblo M.Ya., Fersman A.E. (eds) *Science and technology of the USSR: 1917–1927*. Moscow: Rabotnik prosveshcheniya; 1928. C. 263–316. (In Russ.)
12. Losev O.V. Detector generator; detector amplifier. *Telegrafiya i telefoniya bez provodov = Telegraphy and Telephony without Wires*. 1922;(14):374–366. (In Russ.)
13. Losev O.V. *At the origins of semiconductor technology. Selected Works*. Leningrad: Nauka; 1971. (In Russ.)
14. Novikov M.A. Oleg Vladimirovich Losev – pioneer of semiconductor electronics (On the centenary of his birth). *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 2004;46(1):5–9. (In Russ.)
15. Siforov V.I. (ed.) 15. *Electronics: past, present, future*. Moscow: Mir; 1980. (In Russ.)
16. Samokhin V.P., Kindyakov B.M. n memory of Edwin Armstrong (18.12.1890–31.01.1954). *Nauka i obrazovanie = Science & Education*. 2014;(1). (In Russ.) Available at: <http://engineering-science.ru/doc/695338.html>
17. Colebrook F.M. Homodyne. *Wireless World and Radio Rev*. 1924(13):774.
18. Tucker D.G. The History of the Homodyne and Synchrodyne. *Journal of the British Institution of Radio Engineers*. 1954;14(4):143–154.
19. Beatty R.T. The apparent demodulation of weak station by a strong one. *The Wireless Engineer and Experimental Wireless*. 1928(6):412–420.
20. Kiyashko A. What the magazine “Radiolubitel” No. 10, 1930 wrote about. *Radio*. 1989(10):95. (In Russ.)
21. Aiken C.B. Theory of the detection of two modulation waves by a linear rectifier. *Proc. IRE*. 1933;21(4):601–629.
22. Momot E.G. *Problems and techniques of synchronous radio reception*. Moscow: Gosenergoizdat; 1941. (In Russ.)

23. Hobson G.S., Thomas M. Direct frequency demodulation with frequency-locked Gunn oscillators. *Electronics Letters*. 1971;7(3):67–68.
24. Fomin N.N. (ed.) *Microwave radio engineering devices on synchronized generators*. Moscow: Radio i svyaz; 1991. (In Russ.)
25. Cnaffee J.G. The application of negative feedback to frequency modulation systems. *Proceedings of the IRE*. 1939;27(5):317–331.
26. Vinitsky A.S. *Frequency modulated oscillation transmitter or receiver*. Auth. wit. No. 63529. (USSR) Appl. 09.09.1940, publ. 30.04.1944. (In Russ.)
27. Evtyanov S.I., Shemanaev G.D. Synchronization of an oscillator with tracking loop adjustment. *Elektrosvyaz = Telecommunications*. 1962;(5):3–11. (In Russ.)
28. Guseva V.A., Rodionov Ya.G. Rodionov Ya.G. Synchronized oscillator with tracking tuning. *Elektrosvyaz = Telecommunications*. 1969;(11):31–38. (In Russ.)
29. Alekseev Yu.I. Stability of autodyne asynchronous microwave systems. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 1994;(3):36. (In Russ.)
30. Alekseev Yu.I. Millimeter wave autodyne frequency converter. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 2003;(2):76–78. (In Russ.)
31. Gorbin V.V., Malyshev V.A., Petrosyan A.V. Autodyne asynchronous microwave detector based on a tunnel diode operating at harmonics of the generation frequency. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 1976;31(12):58–62. (In Russ.)
32. Levterov A.N., Radchenko A.F., Krotov V.I. . Investigation of an asynchronous detector with self-pumping on the Gunn diode. *Radiotekhnika = Radio Engineering*. 1984;(1):37–38. (In Russ.)
33. Demiyanenko A.V., Alekseev Yu.I. Investigation of an avalanche-transit diode for detecting microwave amplitude-modulated oscillations. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2010(4):70–74. (In Russ.)
34. Demiyanenko A.V., Alekseev Yu.I., Kovtun D.G. Impedance properties of the impatt converting optical microwave-modulated oscillations diode mode autodyne. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2013;(3):75–79. (In Russ.)
35. Le Thai Son, Alekseev Yu.I., Orda-Zhigulina M.V. Sensitivity system of autodyne detecting microwave amplitude-modulated optical signals. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2013;(1):68–72. (In Russ.)
36. Alekseev Yu.I. Some aspects of application of autodyne asynchronous radio systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2013;58(7):711–715. DOI: 10.1134/S1064226913070012.
37. Demiyanenko A.V., Alekseev Yu.I. Comparison of results of detection of microwave-modulated optical oscillations using avalanche diodes in the amplification, generation and self-heterodyne conversion modes. *Antenny = Antennas*. 2014;(9):75–78. (In Russ.)
38. Sunstein D.E. A New Self-Oscillating Frequency Converter. *IRE Transactions on Broadcast and Television Receivers*. 1955;BTR-1(1):29–35.

39. Nagano S., Ueno H., Kondo H., Murakami H. Self-excited microwave mixer with a Gunn diode and its applications to Doppler radar. *Transaction IECE Japan*. 1969;52-B(3):179–180.
40. Lazarus M.J., Novak S., Bullimore E.D. A Sensitive Millimeter-Wave Self-Oscillating Gunn Diode Mixer. *Proceedings of the IEEE*. 1971;59(5):812–814.
41. Kotani M., Mitsui S. Self-Mixing Effect of Gunn Oscillator. *Electronics and Communication in Japan*. 1972;55-B(12):60–67.
42. Inngs M.R. Self-Oscillating Mixer Cuts Antenna Test Costs. *MicroWaves*. 1978;17(4):100–102.
43. Dixon S., Jacobs H. Millimeter wave self-mixing oscillators. *International Journal of Infrared and Millemeter Waves*. 1981;2(2):347–360.
44. Pantoja F.R., Calazans E.T. Teoretical and Experimental Studies of Gain Compression of Millimeter-Wave Self-Oscillating Mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1985;33(3):181–186.
45. Itoh T. Quasi-optical microwave circuits for wireless applications. *Microwave Journal*. 1995;38(1):64–85.
46. Itoh T., Hsu F.J. Distributed Bragg Reflector Gunn Oscillators for Dielectric Millimeter-Wave Integrated Circuits. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 1979;27(5):514–518.
47. Song B.S., Itoh T. Distrbuted Bragg Reflection Dielectric Waveguide Oscillators. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*. 1979;27(12):1019–1022.
48. Pobanz C.W., Itoh T. Active integrated antennas. *IEEE Potentials*. 1997;16(2):6–10.
49. Chang K., York R.A., Hall P.S., Itoh T. Active integrated antennas. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002;50(3):937–944.
50. Hwang V.D., Itoh T. Quasi-Optical HEMT and MESFET Self-Oscillating Mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1988;36(12):1701–1705.
51. Chew S.T., Itoh T. Application of Volterra Series to the Problem of Self-Oscillating Mixer. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1996;44(2):269–274.
52. Sironen M., Qian Y., Itoh T. A Subharmonic Self-Oscillating Mixer with Integrated Antenna for 60-GHz Wireless Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001;49(3):442–450.
53. Siegel P.H. Terahertz Pioneer: Tatsuo Itoh “Transmission Lines and Antennas: Left and Right”. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2014;4(3):298–306.
54. Zhang J., Wang Y., Chen Z, Integration of a Self-Oscillating Mixer and an Active Antenna. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*. 1999;9(3):117–119.
55. Zhen-Yu Zhang, Ke Wu, Ning Yang. A Millimeter-Wave Sub-Harmonic Self-Oscillating Mixer Using Dual-Mode Substrate Integrated Waveguide Cavity. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2010;58(5):1151–1158.

56. Sun-Hwa Jeong, Hee-Yong Hwang. X-Band Self Oscillating Mixer With Resonator-Antenna Filter. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2014;24(9):611–613.

57. Ho S.S.K., Saavedra C.E. A low-noise self-oscillating mixer using a balanced VCO load. *IEEE Trans. Circuits Systems. I: Regular Papers*. 2011;58(8):1705–1712.

58. Saavedra C.E., Jackson B.R., Ho S.S.K. Self-Oscillating Mixers: A Natural Fit for Active Antennas. *IEEE Microwave Magazine*. 2013;14(6):40–49.

Информация об авторах

Носков Владислав Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроники и телекоммуникаций» Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Галеев Ринат Гайсеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиофизики и специальной электронной аппаратуры» Сибирского федерального университета; генеральный директор АО «НПП «Радиосвязь», г. Красноярск, Россия.

Евгений Владимирович Богатырев, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехники» Сибирского федерального университета; технический директор АО «НПП «Радиосвязь», г. Красноярск, Россия.

Information about the authors

Vladislav Ya. Noskov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Rinat G. Galeev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Radiophysics and Special Electronic Equipment of the Siberian Federal University; General Director of JSC NPP Radio Communication, Krasnoyarsk, Russia.

Evgeniy V. Bogatyrev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Siberian Federal University; Technical Director of JSC NPP Radiosvyaz, Krasnoyarsk, Russia.

Поступила / Received: 12.11.2020

Принята в печать / Accepted: 24.11.2020